

带附加气室空气弹簧悬架动力学特性分析

张晓磊¹, 郑明军^{1*}, 吴文江², 冯国胜¹

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁道大学 工程训练中心, 河北 石家庄 050043)

摘要:基于气体热力学和气体动力学, 推导了带附加气室空气弹簧垂向刚度表达式, 建立了节流孔质量流率数学模型, 并在 AMESim 平台下建立了带附加气室空气弹簧悬架的 1/4 仿真模型, 分析了节流孔横截面积和附加气室容积对带附加气室空气弹簧悬架动力学特性的影响。研究表明: 节流孔横截面积是影响带附加气室空气弹簧悬架阻尼特性的关键因素, 随着节流孔横截面积的增大, 带附加气室空气弹簧悬架阻尼特性呈现先增大后减小的趋势; 增加附加气室可以减小带附加气室空气弹簧悬架系统刚度, 增大附加气室容积可以降低带附加气室空气弹簧悬架系统的自振频率, 有利于改善带附加气室空气弹簧悬架系统的隔震性能。

关键词:带附加气室空气弹簧悬架; 阻尼特性; 刚度特性

中图分类号: TQ336.4⁺2; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2015)10-0609-05

带附加气室空气弹簧具有刚度可变、抗冲击能力强、自振频率低等诸多优点, 带附加气室空气弹簧悬架技术的发展大大提高了汽车行驶平顺性和操纵稳定性^[1-2]。图 1 所示为一种带附加气室空气弹簧模型。工作过程中, 由于车身质量的作用, 带附加气室空气弹簧主气室产生垂向弹性形变, 主副气室间产生压力差, 囊中气体经过节流孔在主副气室之间流动, 附加气室的接入增大了气体的总容量和流通空间, 可降低弹簧的刚度, 节流孔限制了气体的流动速度, 使主副气室间产生压力差, 气体流经节流孔时产生阻尼作用有利于加快车身振动的衰减^[3]。

本文建立带附加气室空气弹簧悬架的运动方程, 并在气体动力学和热力学的基础上推导带附加气室空气弹簧垂向刚度以及节流孔质量流率的数学模型, 借助于 AMESim 平台建立带附加气室空气弹簧悬架系统仿真模型, 并将其应用于带附加气室空气弹簧悬架的动力学特性分析中。

1 数学模型

对于双轴汽车的振动模型, 当悬架质量分配

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11272220); 河北省自然科学基金资助项目(E2013210018)

作者简介:张晓磊(1989—), 男, 河北邯郸人, 石家庄铁道大学硕士研究生, 主要从事车辆系统动力学及控制研究。

* 通信联系人

系数的值约等于 1 的时候, 前后悬架系统的垂直振动接近于独立, 于是可将其简化为图 2 所示的

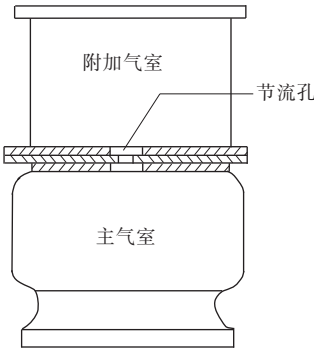
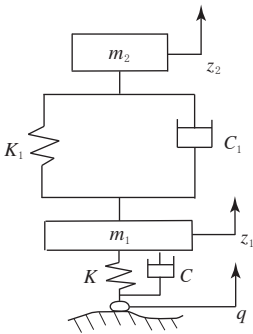


图 1 带附加气室空气弹簧模型



m_1 —车轮质量, kg; m_2 —车身质量, kg; K_1 —带附加气室空气弹簧垂向刚度, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; K —轮胎刚度, $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$; C_1 —节流孔阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$; C —轮胎阻尼系数, $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$;
 q —路面位移激励, m ; z_1 —车轮的垂直位移坐标;
 z_2 —车身的垂直位移坐标。

图 2 空气悬架力学模型

2 自由度悬架振动系统,它不仅能反映车身部分的动态特性,还能反映车轮部分高频共振时的动态特性,因此更接近于汽车悬架系统的实际工况^[4]。

$$\left. \begin{aligned} m_2 \ddot{z}_2 + C_1(\dot{z}_2 - \dot{z}_1) + K_1(z_2 - z_1) &= 0 \\ m_1 \ddot{z}_1 + C_1(\dot{z}_1 - \dot{z}_2) + C(\dot{z}_1 - \dot{q}) + K_1(z_1 - z_2) + K(z_1 - q) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据理想气体状态方程,带附加气室空气弹簧系统内气体压力和容积满足:

$$(P - P_a)(V_1 + V_2)^n = \text{const} \quad (2)$$

式中, P 为带附加气室空气弹簧内气体压力, Pa; P_a 为大气压力, 1.01×10^5 Pa; V_1 为主气室容积, L; V_2 为附加气室容积, L; n 为热力学指数, 绝热过程中 $n=1.4$ 。

$$K_1 = \frac{\partial F}{\partial x} = (P - P_a) \frac{\partial A_e}{\partial x} - n(P - P_a) \frac{A_e^2}{V_1 + V_2} \quad (4)$$

式中,第1部分表示带附加气室空气弹簧主气室有效面积变化引起的刚度;第2部分表示带附加气室空气弹簧容积变化引起的刚度; $\frac{\partial A_e}{\partial x}$ 表示带附加气室空气弹簧主气室有效面积变化率,一般囊式气囊的有效面积变化率为 $0.35 \sim 0.40$,膜式气囊的有效面积变化率为 $0 \sim 0.20$ ^[5]。由式(4)可以看出,当带附加气室空气弹簧主气室有效面

$$\left\{ \begin{aligned} G &= C_d A_s \sqrt{P_U \cdot \rho_U \cdot \frac{2n}{n-1} \left[\left(\frac{P_D}{P_U} \right)^{\frac{2}{n}} - \left(\frac{P_D}{P_U} \right)^{\frac{n+1}{n}} \right]} & \frac{P_D}{P_U} > 0.5282 \\ G &= C_d A_s \sqrt{P_U \cdot \rho_U \cdot n \left(\frac{2}{n+1} \right)^{\frac{n+1}{n}}} & \frac{P_D}{P_U} \leq 0.5282 \end{aligned} \right. \quad (5)$$

式中, C_d 为节流孔流量系数; A_s 为节流孔横截面积, mm^2 ; P_U 为节流孔压力高的一侧压力,称为上流压力, Pa; P_D 为节流孔压力低的一侧压力,称为下流压力, Pa; ρ_U 为节流孔上流空气质量密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

由式(5)可知,节流孔横截面积即节流孔开度对节流孔质量流率影响较大,在带附加气室空气弹簧工作过程中,当节流孔的有效面积变化在规定的范围内时,节流孔质量流率与节流孔横截面积成反比,节流孔横截面积越大,流体流经节流孔时节流孔产生的阻尼作用越小。

2 仿真模型

LMS Imagine. Lab AMESim 为多学科领域复杂系统建模仿真平台,用户可以在此平台上建

1.1 垂向刚度数学模型

图2中, z_1 和 z_2 坐标原点选在各自的平衡位置,得到带附加气室空气弹簧悬架运动方程为

由于受到簧载质量的作用,带附加气室空气弹簧主气室产生的垂向反作用力为

$$F = (P - P_a) A_e \quad (3)$$

式中, A_e 为带附加气室空气弹簧主气室有效承载面积, m^2 。

由式(2)和(3)可得带附加气室空气弹簧工作时产生的垂向刚度为

积变化率及主气室容积一定时,带附加气室空气弹簧悬架系统垂向刚度主要由附加气室容积决定。

1.2 节流孔质量流率数学模型

节流孔质量流率表示单位时间内通过节流孔有效横截面积的物质质量,是衡量节流孔通流能力的重要参数,节流孔通流能力越强,流体流经节流孔时节流孔产生的阻尼作用越小。流经主副气室之间节流孔的气体质量流率可由式(5)计算^[5]:

立复杂的多学科领域的系统模型。

在 AMESim 平台中对带附加气室空气弹簧悬架进行建模时,用1个弹簧-阻尼原件表示汽车轮胎的刚度和阻尼,用2个质量块分别表示非簧载质量(车轮部分)和簧载质量(车身部分),用1个缸体可移动气缸、1个容积可变气室表示空气弹簧主气室。其中,缸体可移动气缸用来模拟空气弹簧主气室垂向弹性变形,容积可变气室用来模拟带附加气室空气弹簧主气室体积的变化^[6-7]。当外界激励信号将力传递给缸体可移动气缸时,其活塞将气缸内部的压强转换为力传递给车体。此外,用一个容积不可变的储气缸表示附加气室,并且在容积可变气室与储气缸之间增加一个节流孔,用来模拟节流孔的阻尼效应。将上述各部件连接,组成1/4双质量空气悬架系统,最后由信号

源对系统输入初始位移表示外界激励。在 AMESim 平台中建立的带附加气室空气弹簧悬架仿真模型如图 3 所示。

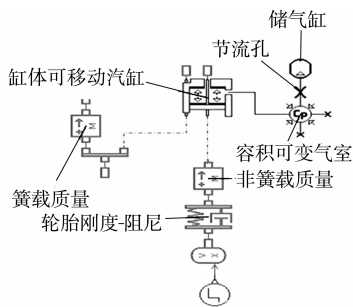


图 3 带附加气室空气弹簧悬架 1/4 仿真模型

3 仿真分析

建立带附加气室空气悬架模型后即可进入运行模式。主要仿真参数: 轮胎刚度 $1.8 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$, 轮胎阻尼 $100 \text{ N} \cdot (\text{s} \cdot \text{m})^{-1}$, 非簧载质量 30 kg , 簧载质量 300 kg , 主气室初始压力 0.3 MPa , 附加气室初始压力 0.3 MPa , 主

气室初始容积 2.0 L , 附加气室初始容积 3.0 L , 节流孔流量因数 0.6 。

仿真过程中, 假设带附加气室空气弹簧系统中气体为理想气体且系统与外界没有热交换, 由上述带附加气室空气悬架的垂向刚度和节流孔质量流率数学模型可知, 节流孔横截面积和附加气室容积对带附加气室空气弹簧悬架系统的动力学特性影响较大, 因此对这两个参数进行研究。

3.1 节流孔横截面积对悬架阻尼特性的影响

带附加气室空气弹簧悬架工作时, 由于主副气室压差较大, 往往采用增加节流孔的方式。其原理是: 囊中气体在主副气室间流动时, 孔板的局部阻力使得流体的压力降低, 能量损耗, 从而起到了阻尼作用, 对振动有良好的衰减效果。为了探究不同节流孔横截面积对带附加气室空气弹簧悬架系统阻尼特性的影响, 仿真时分别设置节流孔横截面积为 $0, 12, 22$ 和 100 mm^2 , 其他参数设置为初始值, 得到簧载质量加速度响应曲线如图 4 所示。

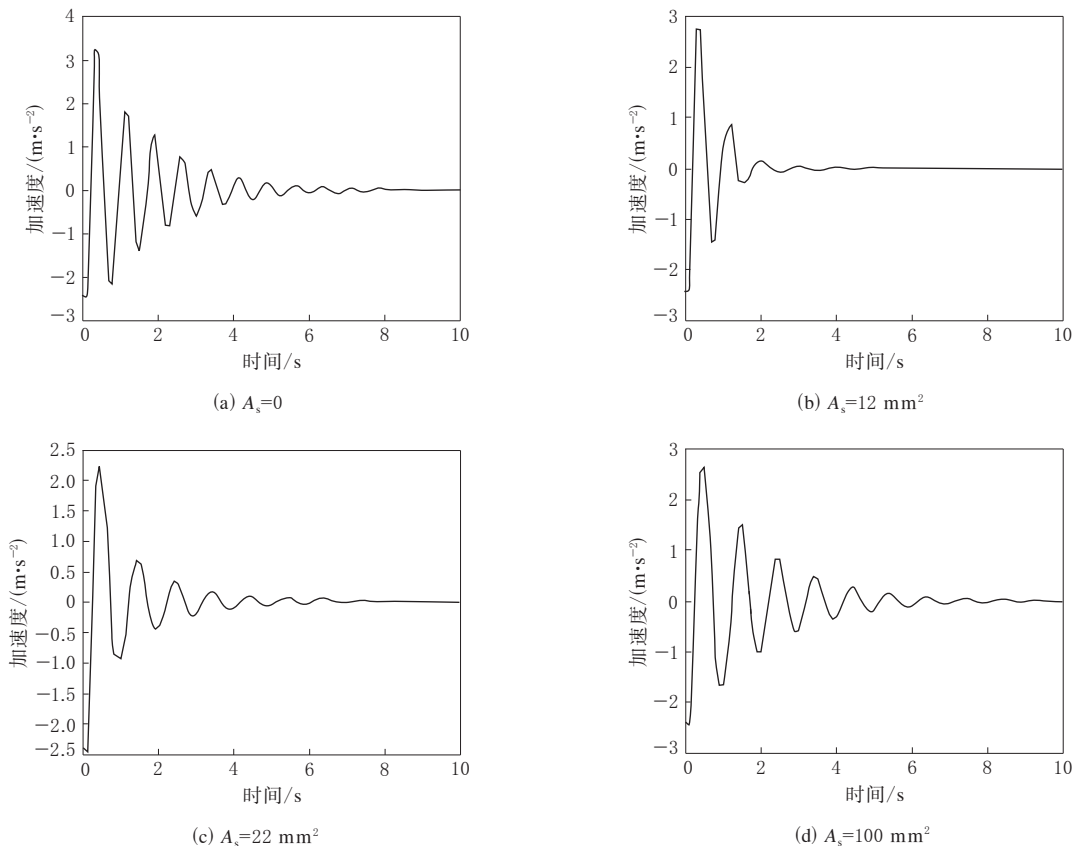


图 4 不同节流孔横截面积时簧载质量加速度响应曲线

图 4(a)~(d)分别表示 4 种不同的节流孔横截面积时簧载质量的加速度响应曲线。图 4(a)表示节流孔完全关闭的状态,此时节流孔和附加气室均不产生作用,带附加气室空气弹簧悬架系统只受到空气弹簧本体和轮胎的阻尼作用,阻尼较小,振动衰减较慢;随着节流孔横截面积的增大,系统阻尼逐渐增大,衰减加快,当节流孔横截面积为 12 mm^2 时,系统阻尼最大,振动衰减效果最明显;当节流孔横截面积继续增大时,衰减效果逐渐减弱,当节流孔横截面积为 100 mm^2 时,系统的衰减效果近似于节流孔全闭的状态。这表明随着节流孔横截面积的增大,节流孔产生的阻尼作用是一个先增大后减小的过程。

此外,从图 4(a)和(d)可以看出,节流孔横截面积较大时的振动频率(约为 1 Hz)比节流孔全闭时的振动频率(约为 1.25 Hz)小,这说明节流孔横截面积较大时系统刚度比节流孔全闭时小,这是由于当节流孔全闭时附加气室不能产生作用,当节流孔横截面积较大时,附加气室产生作

用,带附加气室空气弹簧悬架系统受到附加气室作用明显,囊中气体流通空间增大,刚度较低,因此,增加附加气室有利于降低带附加气室空气弹簧悬架系统刚度。

3.2 附加气室容积对悬架刚度特性的影响

由式(4)可知,当带附加气室空气弹簧主气室容积和有效面积变化率一定时,附加气室容积对系统垂向刚度影响较大。为了研究附加气室容积对悬架刚度特性的影响,选取节流孔横截面积为 12 mm^2 ,对分别带有 $1.0, 2.0, 3.0$ 和 4.0 L 附加气室容积的空气弹簧悬架系统进行分析,得到簧载质量加速度响应曲线,如图 5 所示。

从图 5 可以看出,当附加气室容积分别为 $1.0, 2.0, 3.0$ 和 4.0 L 时,带附加气室空气弹簧悬架系统的振动周期分别约为 $0.7, 0.9, 1.0$ 和 1.2 s ,频率分别约为 $1.43, 1.11, 1.00$ 和 0.83 Hz 。随着附加气室容积的增大,悬架系统振动周期逐渐延长,自振频率减小,说明增大附加气室容积可以减小系统振动频率,降低系统刚度。

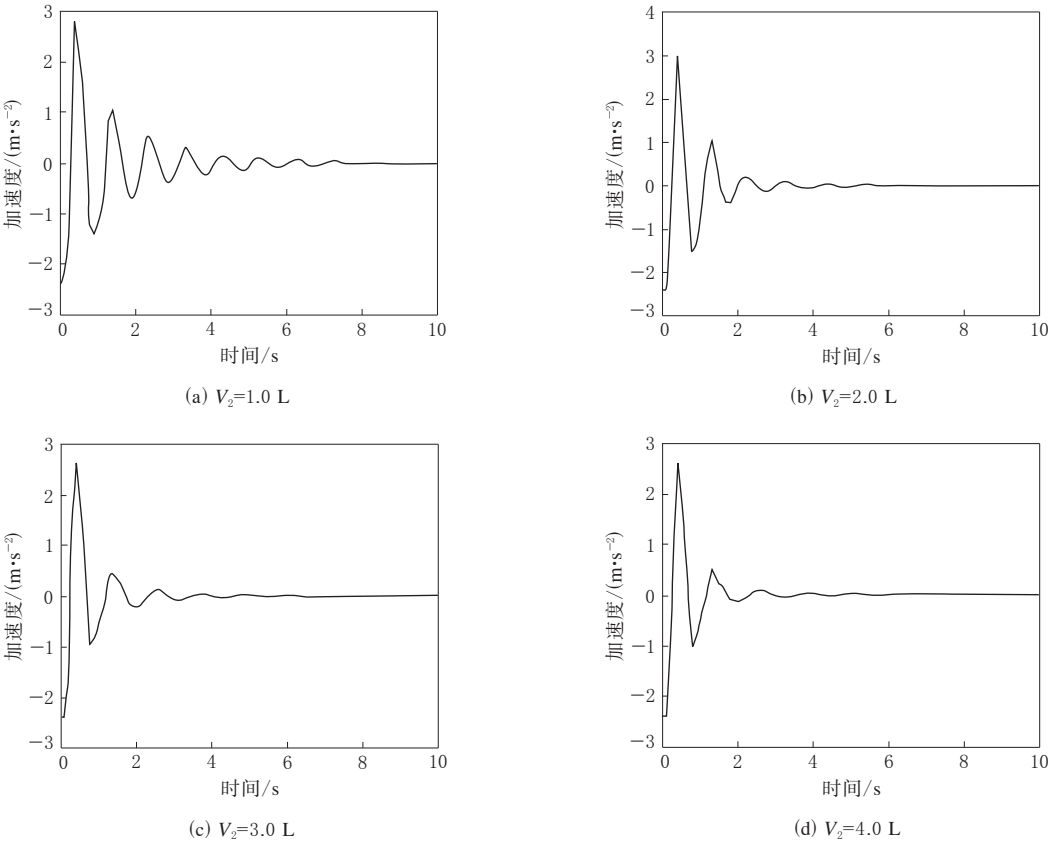


图 5 不同附加气室容积时簧载质量加速度响应曲线

当附加气室容积为 4.0 L、附加气室容积与主气室容积之比为 2 且节流孔横截面积为 12 mm^2 时,带附加气室空气弹簧悬架系统自振频率最低,刚度最小,阻尼作用最明显,对振动衰减最快,带附加气室空气弹簧悬架系统隔震性能最优。

4 结论

通过建立带附加气室空气弹簧悬架的垂向刚度和节流孔质量流率数学模型并借助仿真软件对带附加气室空气弹簧悬架动力学特性进行分析。通过分析得出:节流孔在带附加气室空气弹簧悬架系统中具有阻尼效应,节流孔阻尼作用随节流孔横截面积增大呈现出先增大后减小的趋势,当节流孔横截面积为 12 mm^2 时阻尼作用最大,振动衰减效果最为明显;节流孔横截面积大小影响附加气室的作用效果,增大节流孔横截面积有利于增大附加气室的作用效果,节流孔横截面积越大,附加气室作用效果越明显,带附加气室空气弹簧悬架系统刚度越低;增大附加气室容积相当于增加带附加气室空气弹簧中气体流通空间,能够降低系统固有频率,从而使系统刚度减小,改善带

附加气室空气弹簧悬架系统隔震性能。

参考文献:

- [1] 李美,李仲兴,郭继伟,等. 连接管路管径对空气弹簧动刚度特性的影响[J]. 汽车工程,2012,34(11):1005-1009.
- [2] Chen Y K, He J, King M, et al. Effect of Driving Conditions and Suspension Parameters on Dynamic Load-sharing of Longitudinal-connected Air Suspensions[J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56(3): 666-676.
- [3] 王家胜,朱思洪. 带附加气室空气弹簧动刚度影响因素试验研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(6): 1-5.
- [4] 余志生,夏群生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.
- [5] Liu H, Lee J C. Model Development and Experimental Research on an Air Spring with Auxiliary Reservoir[J]. International Journal of Automotive Technology, 2011, 12(6): 839-847.
- [6] Oman S, Nagode M. On the Influence of the Cord Angle on Air-spring Fatigue Life[J]. Engineering Failure Analysis, 2013, 27(1): 61-73.
- [7] 戚壮,李芾,黄运华,等. 基于 AMESim 平台的轨道车辆空气弹簧系统气动力学仿真模型研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(3): 79-86.

收稿日期:2015-04-07

Analysis on Dynamics Properties of Air Suspension with Additional Air Chamber

ZHANG Xiao-lei, ZHENG Ming-jun, WU Wen-jiang, FENG Guo-sheng

(Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Based on the thermodynamics and kinetics of gas flow, the vertical stiffness expression was developed for the air suspension with additional air chamber, a mathematical model of mass flow rate through the orifice was established, and the 1/4 simulation model of the air suspension was established in AMESim platform. The influence of cross-sectional area of the orifice and the volume of additional air chamber on the dynamic characteristics of the air suspension was analyzed. The results showed that, the cross-sectional area of the orifice was a key factor affecting the damping characteristics of air suspension, and when it increased, the damping properties were improved first and then reduced. Use of additional chamber could reduce the stiffness of the suspension system, and increase of its volume reduced the self-vibration frequency and improved the damping properties of the suspension system.

Key words: air suspension with additional air chamber; damping characteristics; stiffness characteristics